中国生态农业学报 2017 年 7 月 第 25 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2017, 25(7): 949−957

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170070

李欢, 杨玉盛, 司友涛, 刘翥. 短期增温及减少降雨对杉木人工林土壤DOM的数量及其光谱学特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 949−957

Li H, Yang Y S, Si Y T, Liu Z. Effects of short-term global warming and precipitation reduction on the quantity and spectral characteristics of soil DOM in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 949−957

短期增温及减少降雨对杉木人工林土壤 DOM 的数量及其光谱学特征的影响*

李 欢, 杨玉盛, 司友涛**, 刘 翥

(福建师范大学地理科学学院/福建省湿润亚热带山地生态重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地 福州 350007)

摘 要: 本文选取我国中亚热带杉木人工林土壤进行短期增温以及减少 50%降雨试验, 利用光谱技术研究增温及减少降雨对土壤可溶性有机质(DOM)数量和结构的影响。试验设对照(CT)、增温(W, 土壤温度增高 5 ℃)、减少降雨(P, 自然降雨量减少 50%)、增温与减少降雨交互作用(WP)4 种处理。结果表明: 1)增温增加了土壤可溶性有机碳(DOC)数量, 使 DOM 的芳香性指数和腐殖化指数减小, 结构变得简单易于分解; 0~10 cm 土层的土壤 DOM 含有较多的烷烃, 酯类物质较少; 10~20 cm 土层的 DOM 则含有较多的碳水化合物。2)减少降雨使土壤水分相对减少, 土壤 DOC 的数量降低。0~10 cm 土层土壤 DOM 的芳香性指数和腐殖化程度降低, DOM 含有大量的烷烃; 而 10~20 cm 土层土壤 DOM 的芳香性指数和腐殖化指数升高, 碳水化合物少。减少降雨处理使土壤可溶性有机氮(DON)数量增加。3)增温和减少降雨的交互作用增加了 DOC 和 DON 的数量, 降低了 DOM 的芳香化程度和腐殖化程度; 使 0~10 cm 土层的 DOM 含有较多的碳水化合物, 而 10~20 cm 土层的 DOM 碳水化合物较少。4)对于 0~10 cm 土壤, 增温对土壤 DOM 的数量及结构的作用最强; 随着土壤深度增加到 10~20 cm, 减少降雨的作用逐渐明显, 其对 DOM 结构的影响也达到显著水平。温度及降水对 DOM 的数量及化学结构的变化具有重要意义, 该研究结果可以为阐释全球气候变化背景下土壤 DOM 的动态周转及预测未来森林土壤碳氮的变化趋势提供科学依据。

关键词: 杉木人工林; 土壤增温; 减少降雨; 土壤可溶性有机质; 芳香性指数; 腐殖化程度; 光谱学特征
中图分类号: S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)07-0949-09

Effects of short-term global warming and precipitation reduction on the quantity and spectral characteristics of soil DOM in *Cunninghamia lanceolata* plantation*

LI Huan, YANG Yusheng, SI Youtao**, LIU Zhu

(College of Geographical Sciences, Fujian Normal University / Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded), Fuzhou 350007, China)

Abstract: As a small but reactive soil organic matter (SOM) pool, dissolved organic matter (DOM) is considered to be a sensitive indicator of the dynamic of SOM and an important component of terrestrial biogeochemical cycle. The quality and quan-

* 国家自然科学基金面上项目(31570606)和福建省自然科学基金面上项目(2015J01120)资助
** 通讯作者: 司友涛, 主要从事森林土壤有机质的稳定与全球碳、氮循环的研究。E-mail: yt.si@fjnu.edu.cn
李欢, 主要从事森林生态系统碳氮循环的研究。E-mail: lhsylvia@163.com
收稿日期: 2017-01-20 接受日期: 2017-03-14

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31570606) and Fujian Natural Science Foundation (2015J01120).
** Corresponding author, E-mail: yt.si@fjnu.edu.cn
Received Jan. 20, 2017; accepted Mar. 14, 2017

tity of DOM are crucial in the dynamics of C, N and other nutrients in forest soils because these attributes are closely related to carbon accumulation in soil and nutrient availability to microorganisms and plants. Global warming has been widely recognized and has induced drastic changes in global precipitation patterns. Because temperature and precipitation are the two most important environmental drivers regulating forest SOM cycle, it is critical that we have a solid understanding of the response of soil DOM to such climatic changes. In this study, we conducted a short-term experiment in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China that stimulated soil warming and precipitation decline. The objective of the study was to address the effects of the two factors (temperature and precipitation) on the quantity and composition of DOM. The experimental design was a randomized complete block factorial design, with warming and precipitation as fixed factors. The four treatments (each replicated three time) were set up in the experiment included no warming and natural precipitation (CT), warming and natural precipitation (W), no warming and reduced precipitation (P), warming with reduced precipitation (WP). We found that: 1) W treatment increased the quantity of labile soil dissolved organic carbon (DOC), but decreased the aromaticity and humification degree of DOM. The 0–10 cm soil layer contained more alkanes and little esters, while the 10–20 cm soil layer had more carbohydrates. 2) P treatment resulted in a smaller soil water content, which limited DOC production. In the 0–10 cm soil layer, soil DOM was apparently less humified and less condensed, with much alkanes present. However, in the 10–20 cm soil layer, aromaticity and humification degree were enhanced, while the quantity of carbohydrates decreased. In addition, precipitation decline also improved the quantity of DON. 3) The combination of warming climate and declining precipitation increased the concentrations of DOC and DON, and reduced the aromaticity index and humification degree. The 0–10 cm soil layer had relatively more carbohydrates than the 10–20 cm soil layer. 4) In the 0–10 cm soil layer, warming climate was the only factor that significantly influenced the quantity and quality of DOM. With increasing soil depth, precipitation decline became the second significant factor influencing soil DOM structure. Our results provided a deeper insight into the dynamic changes of soil DOM under global warming and declining precipitation, which was helpful in more accurately predicting soil C and N cycle in response to future global climate change.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* plantation; Soil warming; Precipitation reduction; Soil dissolved organic matter; Aromaticity index; Humification degree; Spectral characteristics

可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)是能够溶解于水、酸或碱溶液的有机物，通常定义为通过0.45 μm的孔径滤膜的大小和结构不同的有机分子的连续统一体[1]。它包括可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、可溶性有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)和可溶性有机磷(dissolved organic phosphorus, DOP)等[1-2]。DOM是陆地生态系统中一种极为活跃的化学组分，能敏感地反映土壤有机质的变化[3]；它也是土壤微生物最重要的能量和养分源，是陆地生物地球化学循环重要的组成部分[2]；同时对营养元素由森林生态系统向水环境的运输起着至关重要的作用[4]。

从工业革命至今，化石燃料的大量开采和使用造成大气中“温室气体”的剧增，改变了地球原有的大气组分和生物化学循环，产生了以气候变暖为主要特征的气候变化[5]。据2013年IPCC最新的气候变化研究显示，1880—2012年全球平均地表温度大约上升了0.85 ℃[6]。气候变暖还会导致陆地生态系统干旱频繁，降雨格局改变，纬向平均降水很可能在高纬度和部分中纬度地区增加，而在亚热带地区则会减少[7]。目前人们已经广泛地观测到全球和局域性的陆地生态降水的格局变化[8]。温度和水分是影响生态系统过程的关键因子，全球变暖及降雨格局的改变势必会影响森林生态系统的结构与功能[9-10]，而这首先体现在森林土壤DOM数量和质量的变化上。因此研究土壤DOM对温度和水分的响应对于理解未来森林生态系统碳、氮循环有着重要的理论意义。

目前，温度、降雨作为单因子控制试验的研究已有报道，但存在许多不足和争议。有研究表明DOC数量在温暖的气候下增加[11]。MacDonald等[12]却没有发现温度对土壤中的DOC有影响，这可能是因为DOC的分解与产生速率相同。McDowell等[13]的研究表明，DON的浓度随着温度的升高而增加，夏季DON的含量比冬季高；另外有研究结果却截然相反，夏季温度较高，由于矿化速率加大，DON的浓度反而比较低[14]。土壤温度和湿度是影响凋落物和土壤有机质的微生物分解过程的主要因素，进而影响土壤DOM；而Guggenberger等[15]并没有发现水分对土壤DOC浓度和组分有影响。由此可见，温度与水分的作用对土壤DOM的影响极为复杂。

因此，在野外典型森林生态系统建立多气候因子试验平台，模拟未来全球气候变化，探讨温度和水分对土壤DOM的影响具有重要的意义。然而，现有的野外增温控制平台主要集中在中高纬地区，关

于我国亚热带地区的生态系统水平的野外增温结合多种气候变化因子的试验鲜有报道[16]。我国湿润亚热带地区是全球同纬度的“绿洲”，同时由于商品林基地建设，此地区大面积的常绿阔叶林被改造成杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林，占世界人工林面积的6.5%[17]。为深入了解杉木人工林对未来气候变化的响应，本文在杉木幼林设置增温与减少降雨多因子试验平台，并以土壤DOM为对象，结合紫外-可见光谱(UV-Vis)、荧光光谱(FS)以及傅里叶变换红外光谱(FTIR)等技术，研究DOM的数量以及化学结构对增温及降水的响应，以期深入了解全球气候变化对森林生态系统碳、氮循环的影响。

1　试验地概况与试验方法

1.1　试验地概况

试验区位于福建三明森林生态系统与全球变化定位观测研究站——三明陈大林业国有林场观测点(26°19′N, 117°36′E)。该地平均海拔300 m，属中亚热带季风气候，年均气温19.1 ℃，年均降雨量1 749 mm，相对湿度81%。土壤为黑云母花岗岩发育的红壤[18]。

1.2　试验设计

于2013年在试验地设置若干个面积为2 m × 2 m的试验小区，四周用4块PVC板(200 cm × 70 cm)焊接，使小区与小区之间的土壤隔开，防止各小区相互干扰。将黑云母花岗岩发育的土壤分层(0~10 cm、10~20 cm、20~70 cm)取回后剔除粗根、石块和其他杂物，然后将土壤分层混合均匀重填回试验小区，同时采用压实法调整土壤容重与原位土壤容重接近，以最大程度地消除样地间的异质性。

试验设对照(CT)、增温(W)、减少降雨(P)、增温与减少降雨交互作用(WP)4种处理，每个处理3个重复。于2013年10月在所有试验小区平行布设相同的加热电缆，深度为10 cm，间距为20 cm，且在最外围环绕一周，保证样地增温的均匀性。电缆布设完成5个月后(2014年3月)开始通电增温(只有W和WP小区增温，且增温土壤始终比对照土壤高5 ℃)。减少降雨处理即在P和WP试验小区内，在离地面1.5 m处每隔5 cm均匀地布设一个0.05 m×5 m的透明U型管，从而隔离50%的自然降雨[16]。于每个试验小区内种植4棵杉木幼树，杉木的位置设于两条电缆线之间(图1)。

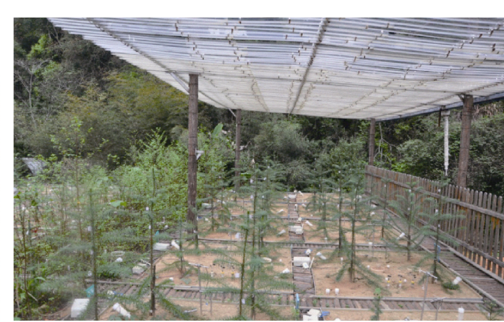



图 1　试验样地图
Fig. 1　Pictures of experimental plots

1.3　样品采集

于 2014 年 10 月进行采样，在每个小区按 S 型布设 5 个土壤取样点，按 0~10 cm、10~20 cm 分层取样。样品带回室内，去除碎屑、砂砾以及植物根系，将每块样地中的 5 个取样点相同层次的土样混合成一个样品，过 2 mm 筛，取一部分测定土壤基本理化性质，其余部分用于提取 DOM。

1.4　样品测定

1.4.1　土壤基本理化性质测定

pH 采用 CHN868 型 pH 计(Thermo Orion)测定，水土比为 2.5∶1。土壤总有机碳、总氮采用碳氮元素分析仪(VarioMAX, Elementar, Munchen, Germany)测定。4 种处理的土壤基本性质见表 1。

1.4.2　土壤 **DOM** 的测定

土壤 DOM 的提取采用水浸提法[19]。采用有机碳分析仪(TOC-VCPH, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定滤液中的 DOC 含量；采用连续流动分析仪(San^{++}, Skalar, Breda, Netherlands)测定 DON 含量。使用紫外-可见分光光度计(UV-2450, Shimadzu, Kyoto, Japan)测定紫外可见吸光值，通过测定待测液在波长为 254 nm 处的吸收值(Special Ultraviolet-Visible Absorption, SUVA)可以分析 DOM 的芳香化程度。SUVA 也称芳香性指数(aromaticity index, AI)，计算方法为 AI =(UV_{254}/DOC)×100(UV_{254} 为 254 nm 处的紫外光吸收)[20]。采用日立 F7000 仪器(F7000, Hitachi, Toykyo, Japan)测定荧光光谱，激发和发射光栅狭缝宽度为 5 nm，扫描速度为 1 200 nm·min^{-1}，其中激发光谱波长为 254 nm，发射波长范围为 300~480 nm；荧光同步波长范围为 250~500 nm。为提高灵敏度，荧光光谱测定前用稀盐酸将待测溶液的 pH 值调为 2[20]。其中荧

光同步光谱波长 460 nm 与 345 nm 处荧光强度的比值为腐殖化指数(humification index, synchronous mode, HIX), 即 HIX=I_{460}/I_{345}(I_{460}: 荧光同步光谱波长为 460 nm 时的荧光强度; I_{345}: 荧光同步光谱波长为 345 nm 时的荧光强度)[20]。腐殖化指数可以表示 DOM 的聚合程度[21]。将 4 mg 冷冻干燥的样品与 400 mg 干燥的 KBr(光谱纯)研磨混匀, 并在 10 t·cm^{-2} 压强下压制成薄片, 用 FTIR 光谱仪(Cary 660 FTIR)测定红外光谱, 扫描范围设为 4 000~400 cm^{-1}。

1.5 数据处理与分析

使用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。采用单因素方差分析和独立样本 *t* 检验比较相同土层不同处理间和同一处理在不同土层间土壤 DOM 的数量和光谱学特征值的差异性。采用双因素方差分析分析同一土层中 W、P 因子对 DOM 的数量和光谱学特征值的影响(P<0.05)。相关图表采用 Microsoft Excel、Origin 完成。

2 结果与分析

2.1 增温、减少降雨及其交互作用下土壤性质的变化

如表 1 所示, 与 CT 相比, 两土层的土壤经 W、P、WP 处理后, 土壤含水量均呈下降的趋势。土壤经 W、P、WP 处理后土壤 pH 均降低, 其中 W 和 WP 处理后土壤 pH 显著低于不增温的土壤; 在同一种处理下, 10~20 cm 土层的 pH 高于 0~10 cm 土层。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 与 CT 相比, W、P、WP 的 SOC、STN 和 C/N 均有降低趋势。

表 1 增温和降雨减少及其交互作用对杉木人工林土壤主要性质的影响

Table 1 Main soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation under short-term soil warming and precipitation reduction and their interaction

土壤性质 Soil property	土层 Soil layer (cm)	处理 Treatment			
		对照(CT) Control	增温(W) Soil warming	减少降雨(P) Precipitation reduction	增温×减少降雨(WP) Soil warming and precipitation reduction
含水量 Water content (%)	0~10	14.20±0.71Ab	10.13±0.25Bb	13.93±0.25Aa	13.87±0.68Aa
	10~20	16.20±0.43Aa	14.47±0.41Ba	14.47±0.34Ba	14.67±0.96ABa
pH	0~10	4.32±0.04Aa	4.12±0.03Bb	4.25±0.06Ab	4.10±0.03Bb
	10~20	4.48±0.08Aa	4.22±0.01Ba	4.45±0.02Aa	4.32±0.05Aa
总有机碳 Soil organic C (g·kg^{-1})	0~10	15.12±2.96Aa	13.16±0.43Aa	13.52±1.25Aa	14.05±0.25Aa
	10~20	15.32±3.09Aa	13.37±0.22ABa	11.49±1.03Ba	12.61±0.29ABb
总氮 Soil total N (g·kg^{-1})	0~10	1.43±0.27Aa	1.28±0.05Aa	1.28±0.13Aa	1.34±0.04Aa
	10~20	1.47±0.25Aa	1.31±0.02ABa	1.16±0.06Ba	1.25±0.02ABa
碳氮比 C/N	0~10	10.60±0.06Aa	10.31±0.33Aa	10.56±0.20Aa	10.51±0.50Aa
	10~20	10.39±0.45Aa	10.24±0.05Aa	9.89±0.38Aa	10.07±0.07Aa

不同大写字母表示同一土层内不同处理间差异显著, 不同小写字母表示同一处理在不同土层间差异显著(P<0.05), 结果表示为平均值±标准差(n=3)。Different capital letters indicate significant differences among treatments in the same soil layer, different lowercase letters indicate significant differences between soil layers under the same treatment (P < 0.05). Data are mean ± SD (n = 3).

2.2 增温、减少降雨及其交互作用对土壤 DOM 数量的影响

由图2可知, 在0~10 cm土层, 与CT相比, W、WP两种处理均增加了土壤DOC的含量, 分别增加7%、19%; 而P处理则降低了土壤DOC的含量。在10~20 cm土层, 各处理DOC含量与0~10 cm土层有相同的变化趋势, 但差异并不显著。同一种处理的土壤, DOC含量均表现为0~10 cm土层高于10~20 cm。对于两个土层, W、P、WP的土壤DON含量均高于CT, 且上层土壤的DON含量大于下层土壤。

2.3 增温、减少降雨及其交互作用对土壤 DOM 紫外光谱特征的影响

表2为4种处理的土壤DOM的紫外光谱特征。由表2可知, 在0~10 cm土层, 与CT相比, W、P以及WP处理的土壤, AI值均降低, 分别降低了53%、27%、60%, 双因素方差分析显示, W的作用显著(表3)。在10~20 cm土层, 与CT相比, W、WP处理的土壤, AI值分别降低了45%、15%, 而P处理的土壤, AI值却升高了78%, 双因素方差分析显示, W和P的作用显著(表3)。总体上看, CT、W处理的土壤AI值随土层加深而降低, 而P、WP处理土壤AI值随着土层加深而升高, 但是没有显著性差异。

2.4 增温、减少降雨及其交互作用对土壤 DOM 荧光光谱特征的影响

图3为4种处理土壤DOM的荧光发射光谱图。图3显示, 在0~10 cm与10~20 cm土层, 与CT相比, W、P、WP处理后, 波峰对应的发射光的波长向短波方

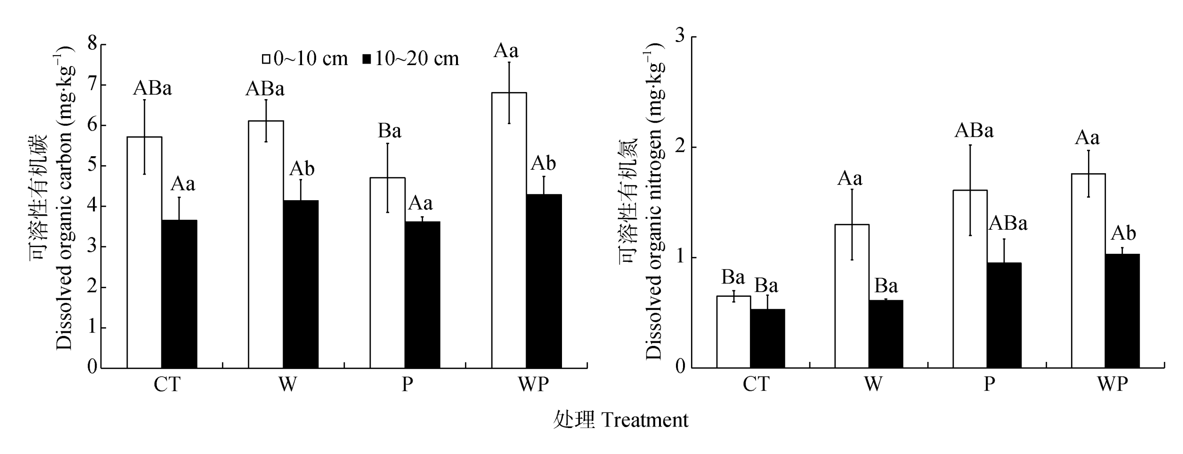


图 2　增温和降雨减少及其交互作用对杉木人工林土壤可溶性有机碳及可溶性有机氮数量的影响

Fig. 2　Quantities of soil dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen of *Cunninghamia lanceolata* plantation under short-term soil warming and precipitation reduction and their interaction

CT: 对照; W: 增温; P: 减少降雨; WP: 增温×减少降雨。不同大写字母表示同一土层内不同处理间差异显著, 不同小写字母表示同一处理在不同土层间差异显著($P<0.05$)。结果表示为平均值±标准差($n=3$)。CT: control; W: soil warming; P: precipitation reduction; WP: soil warming and precipitation reduction. Different capital letters indicate significant differences among treatments in the same soil layer, different lowercase letters indicate significant differences between soil layers under the same treatment ($P < 0.05$). Data are mean ± SD ($n = 3$).

表 2　增温和降雨减少及其交互作用对杉木人工林土壤可溶性有机质(DOM)的光谱学特征值的影响

Table 2　Spectroscopic characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) of *Cunninghamia lanceolata* plantation under short-term soil warming and precipitation reduction and their interaction

处理 Treatment	芳香性指数 Aromaticity index		腐殖化指数 Humification index	
	0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm
CT	3.87±1.09Aa	2.42±0.42Ba	0.28±0.04Aa	0.16±0.04Bb
W	1.81±0.11Ba	1.34±0.14Aa	0.14±0.02Ba	0.12±0.02Ba
P	2.84±0.88Aa	4.30±1.38Aa	0.22±0.05ABa	0.25±0.05Aa
WP	1.54±0.25Ba	2.06±0.63Ba	0.15±0.01Ba	0.17±0.03Ba

CT: 对照; W: 增温; P: 减少降雨; WP: 增温×减少降雨; 不同大写字母表示同一土层内不同处理间差异显著, 不同小写字母表示同一处理在不同土层间差异显著($P<0.05$)。结果表示为平均值±标准差($n=3$)。CT: control; W: soil warming; P: precipitation reduction; WP: soil warming and precipitation reduction. Different capital letters indicate significant differences among treatments in the same soil layer, different lowercase letters indicate significant differences between soil layers under the same treatment ($P < 0.05$). Data are mean ± SD ($n = 3$).

表 3　增温、减少降雨及其交互作用对杉木人工林土壤可溶性有机质(DOM)数量及光谱学特征影响的方差分析

Table 3　Variance analyses of soil warming, precipitation reduction and their interaction on quantity and spectroscopic characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) of *Cunninghamia lanceolata* plantation under short-term soil warming and precipitation reduction and their interaction

土层 Soil layer (cm)	指标 Index	因子 Factor		
		增温(W) Soil warming	减少降雨(P) Precipitation reduction	增温×减少降雨(WP) Soil warming and precipitation reduction
0~10	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon	NS	NS	NS
10~20		NS	NS	NS
0~10	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen	NS	**	NS
10~20		NS	**	NS
0~10	芳香性指数 Aromaticity index	**	NS	NS
10~20		*	*	NS
0~10	腐殖化指数 Humification index	**	NS	NS
10~20		*	*	NS

NS: 没有显著差异。NS: no significant differences. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

向移动, 且波峰对应的波长顺序为: WP<W<P＜CT, 表明CT处理的土壤DOM结构更为复杂, 而W、P、WP的结构相对简单。

如表2所示, 在0~10 cm土层, W、P、WP处理土壤DOM的腐殖化指数HIX值均比CT低, 其中W、WP显著降低了50%、46%, 表明CT土壤DOM腐殖化程

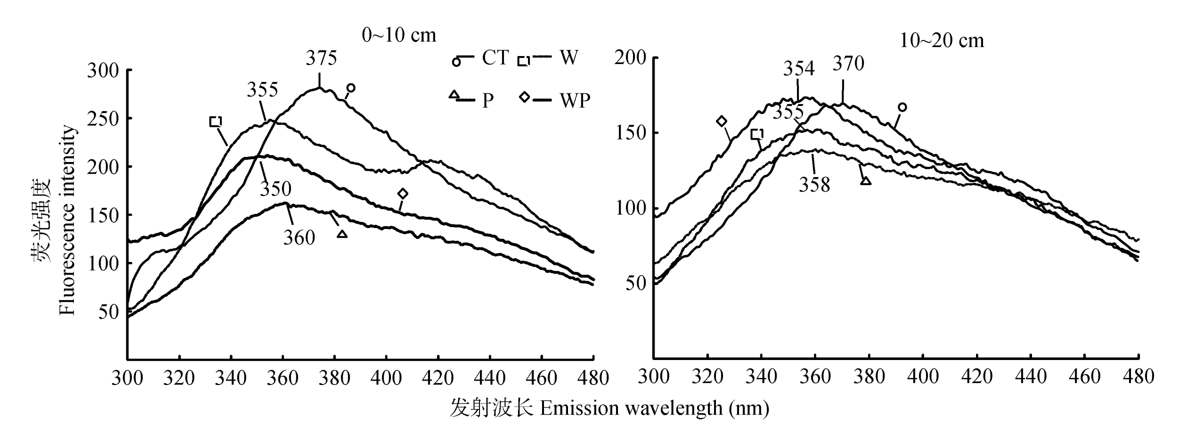


图 3 增温、减少降雨及其交互作用下杉木人工林土壤可溶性有机质(DOM)的荧光发射光谱图

Fig. 3 Fluorescence emission spectra of soil dissolved organic matter (DOM) of *Cunninghamia lanceolata* plantation under short-term soil warming and precipitation reduction and their interaction

CT: 对照; W: 增温; P: 减少降雨; WP: 增温×减少降雨。CT: control; W: soil warming; P: precipitation reduction; WP: soil warming and precipitation reduction.

度最高。双因素方差分析显示, W的作用显著(表3)。在10~20 cm土层，与CT相比，W、WP的HIX值无显著性变化，而P则显著升高，双因素方差分析显示, P对HIX的作用显著(表3)。

2.5 增温、减少降雨及其交互作用对土壤 DOM 的傅里叶红外光谱特征的影响

图4为不同处理土壤DOM的红外光谱。红外光谱在3 696 cm^{-1}附近的吸收峰为N–H的伸缩振动吸收; 3 600~3 200 cm^{-1}范围内强而宽的吸收峰为氢键键合的羟基的伸缩振动，它主要来自DOM样品中的纤维素、淀粉和糖类等碳水化合物以及醇类、酚类等; 2 960 cm^{-1}附近的吸收峰为–CH_3的反对称伸缩振动; 2 852 cm^{-1}附近的吸收峰为–CH_2的对称伸缩振动; 1 680 cm^{-1}附近的吸收峰为C=O伸缩振动; 1 610 cm^{-1}附近的吸收峰为有机羧酸盐R–CO_2^-的反对称伸缩振动以及木质素中与苯环相连的C=O的伸缩振动; 1 383 cm^{-1}处的吸收峰为烷烃的C–H的弯曲振动; 1 149 cm^{-1}、1 120 cm^{-1}附近的吸收峰为碳水化合物的C–O伸缩振动; 1 033 cm^{-1}可能是一些酯类的吸收; 900~650 cm^{-1}处的吸收峰为芳烃C–H的面外弯曲振动[22-23]。

在0~10 cm土层，W处理在1 383 cm^{-1}处的吸收峰的相对强度高于CT，但1 033 cm^{-1}的吸收峰却相对变弱，说明土壤经增温处理后，促进了DOM的分解，产生了大量的烷烃。P处理在1 383 cm^{-1}有最强的吸收峰，其相对比例高于其他3种处理，可见减少降雨对DOM的分解也有一定的作用，与此相对应的是P的芳香性指数和腐殖化指数降低，土壤DOM含有的芳香化合物比CT少。WP处理的DOM在碳水化合物区的相对吸收强度明显高于P处理，但烷基吸收弱于P处理，和CT处理的DOM相似。说明在增温和减少降雨双因子交互作用下，土壤DOM的缩合程度降低，芳香物质减少，WP的DOM分解后产生了较多的碳水化合物。值得注意的是WP的N–H吸收在4种处理中是最明显的，与此对应的是WP的DON含量高于其他几种处理。

对于10~20 cm土壤，W处理在1 149 cm^{-1}和1 120 cm^{-1}处的吸收相对于CT变强，表明含有较多的碳水化合物，这是因为增温使有机质分解，DOM的芳香性指数和腐殖化程度降低; P处理的烷基吸收峰(1 383 cm^{-1})相当尖锐，说明该土层土壤经减少降雨处理后，有机质分解后产生较多的烷基化合物; WP和CT之间的红外吸收较为接近。整体而言, P、WP中的碳水化合物较少。

3 讨论

DOM是土壤有机质中活跃的组分[3]，本研究选取以杉木幼林土壤DOM为研究对象，探讨土壤增温和减少降雨的影响。对于0~10 cm土层，增温使DOC呈数量增加且结构变简单的趋势。土壤DOM样品的芳香化程度及分子量与其紫外吸收值SUVA呈正相关关系[24-25]，而DOM的腐殖化程度HIX能够描述DOM的分子结构以及DOM中芳香性化合物的含量[26-27]。其中W处理的SOC含量最低但DOC含量高，这很可能是单纯的W处理通过升高温度降低了SOC的活化能，使SOC分解加快[28]。Marilley等[29]发现增温能够增加微生物量碳(MBC)的含量，激发效应通过激活微生物活性来释放出更多胞外酶来促进原有SOC的分解[30]。红外光谱显示，W在1 383 cm^{-1}的吸收比例比CT大，在1 033 cm^{-1}的吸收比例变小；在1 383 cm^{-1}处的吸收来自烷基结构，是矿化后的产物，这也是W处理

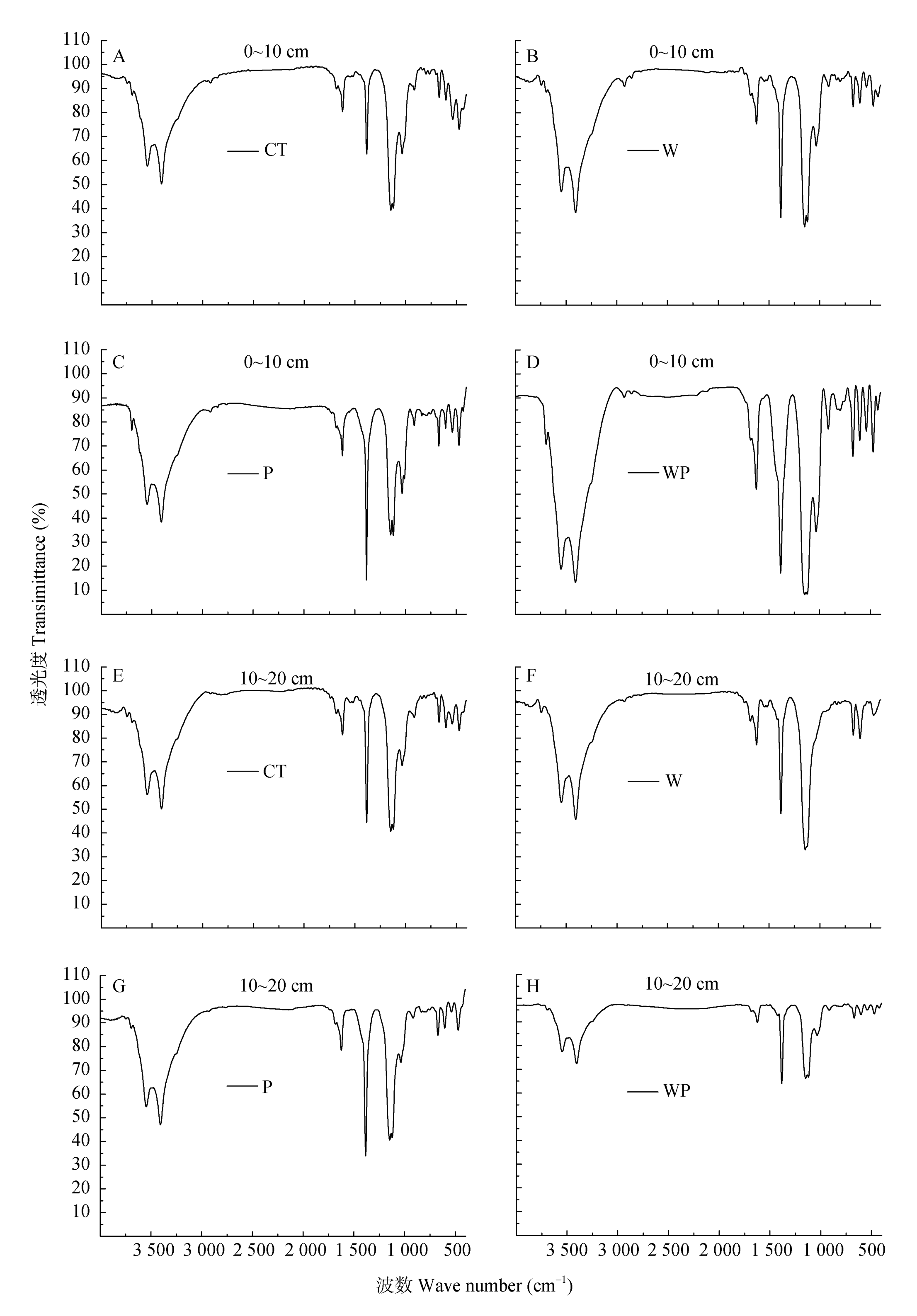


图 4　增温、减少降雨及其交互作用下杉木人工林土壤可溶性有机质(DOM)红外光谱图

Fig. 4　FTIR spectra of soil dissolved organic matter (DOM) of *Cunninghamia lanceolata* plantation under short-term soil warming and precipitation reduction and their interaction

CT: 对照; W: 增温; P: 减少降雨; WP: 增温×减少降雨。CT: control; W: soil warming; P: precipitation reduction; WP: soil warming and precipitation reduction.

土壤加快DOM矿化的证据。W与CT相比，碳水化合物吸收区的相对比例增强，这与W的AI和HIX最低相吻合。单纯P处理的土壤DOC数量最少，其结构也比W和WP复杂。由于水分减少，SOC转化为DOC的机会减少，易于被微生物分解的DOC早已分解完，所以P的1 383 cm^{-1}的烷基吸收峰最大，P的DOC结构

也比增温样地复杂。P处理的SOC相比于CT降低，一方面可能是土壤孔隙变大后自养呼吸加大所致；另一方面是由于来自于地上杉木穿透雨的数量和植物根系分泌物减少，土壤中的碳输入相对减少所致。长时间的干旱会使植物缺少水分，从而限制其生长[31]，因此减少了土壤DOC的来源。WP处理的土壤DOC数量最多，SOC的数量和CT也十分接近。WP是W和P的双重因子叠加，土壤增温的活化作用有利于SOC向DOC的转化，同时由于土壤水分的减少，微生物活性大大降低，DOC被分解的速率也大大降低，因而WP的DOC数量最多。WP处理的DOC的AI也最低，WP的红外和CT最为接近，这些都说明WP处理中微生物分解DOC的活性明显低于W和P处理。双因子方差分析显示，对于0~10 cm土壤，仅W因子对DOC数量和结构的影响达到显著水平。

对于10~20 cm土层，各处理的DOC和DON数量与上层土壤有相似趋势；但DOC的结构与上层土略有差异。在这一土层中P处理的DOC最少，结构也最复杂(与其他处理的差异达显著水平)，可能是因为在10~20 cm深度，水分减少的影响更加显著，大于对0~10 cm表层土壤的影响；水分减少不利于SOC活化为DOC，也不利于植物生长，降低了根系分泌物等的产生，因而土壤DOC中碳水化合物的含量低，微生物可利用的碳少。红外光谱中，这层土壤P处理比CT的1 383 cm^{-1}强，这些烷基结构不易被微生物利用，应该是分解后的产物；同时P处理在1 033 cm^{-1}处的吸收也减弱，与此相反的是P处理的0~10 cm土层在1 033 cm^{-1}处的吸收没有减弱；红外的数据和AI、HIX相吻合。由于P处理的上述影响，WP处理的土壤DOC结构也比W处理复杂。双因子方差分析显示，P和W处理在影响10~20 cm土壤DOC的AI和HIX时都达到显著水平。然而，需要指出的是，虽然P处理的土壤DOC最不容易被微生物利用，但P处理的SOC相对来说比较低，仅仅比W高处理，这一方面是因为P处理的植物生物量减少，另一方面也说明P处理的SOC也曾经快速矿化，只是在此次取样分析时快速分解阶段已经结束，只剩下难以分解的物质。

P因子对DON数量的影响大于W因子，P和WP处理的DON含量最高。氮是微生物分解有机质所需的营养元素，DON的积累从某种意义上来讲意味着微生物矿化速率慢，这应该是微生物分解的底物碳的质量较低所致。事实上，本试验中两层土的SOC和STN有相似的变化趋势，这进一步说明整体来看，对于微生物分解土壤有机质同时需要碳源和氮源，而碳或者氮有一方面质量较低，都会影响微生物矿化SOC的速率。

4 结论

本研究通过一系列光谱手段发现，土壤增温可以活化土壤SOC为DOC，通过激发效应等渠道促进SOC的矿化，使土壤由碳汇转变为碳源，土壤DOM的芳香性指数和腐殖化程度降低。减少降雨在短期内会加速SOC矿化，使土壤SOC含量降低，DOM的结构变得较简单；但到后期减少降雨会通过降低底物的可利用性来抑制微生物的活性，土壤DOC的结构变得复杂，芳香化和腐殖化程度升高，同时使DON富集。增温×减少降雨处理的DOM数量最多，这是增温和减少降雨共同作用的结果；在增温、减少降雨双因子交互作用下，土壤DOM的其芳香性指数和腐殖化指数均减小。对于0~10 cm土壤，土壤增温的作用最强；随着土壤深度增加到10~20 cm，水分减少的作用逐渐明显，减少降雨也成为一个显著影响DOM结构的因子，且减少降雨是唯一显著影响DON数量的因子。

温度和降水对 DOM 数量及结构的变化具有重要意义，但是野外条件相对复杂，影响 DOM 的动态周转还包括其他机制，只有通过长期观测，并将其他因素的影响机制考虑进来，才能更好地了解气候变化对土壤碳氮循环的影响。

参考文献 References

[1] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. Soil Science, 2000, 165(4): 277–304
[2] 杨玉盛, 郭剑芬, 陈光水, 等. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 547–558
Yang Y S, Guo J F, Chen G S, et al. Origin, property and flux of dissolved organic matter in forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 547–558
[3] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(12): 1647–1656
[4] Bolan N S, Adriano D C, Kunhikrishnan A, et al. Chapter one-dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils[J]. Advances in Agronomy, 2011, 110: 1–75
[5] 周广胜, 王玉辉. 全球生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2003
Zhou G S, Wang Y H. Global Ecology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003
[6] Stocker T, Plattner G K, Dahe Q. IPCC climate change 2013: the physical science basis-findings and lessons learned[C]//EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Confer-

ence Abstracts. Vienna, Austria: EGU, 2014

[7] 董思言, 高学杰. 长期气候变化——IPCC 第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56–59
Dong S Y, Gao X J. Long-term climate change: Interpretation of IPCC fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 56–59

[8] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007

[9] Aronson E L, Mcnulty S G. Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(11): 1791–1799

[10] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298(5601): 2173–2176

[11] Perdue E M, Gjessing E T, Glaze W. Organic Acids in Aquatic Ecosystems: Report of the Dahlem Workshop on Organic Acids in Aquatic Ecosystems, Berlin 1989, May 7-12[M]. Wiley, 1990

[12] MacDonald N W, Randlett D L, Zak D R. Soil warming and carbon loss from a lake states Spodosol[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(1): 211–218

[13] McDowell W H, Currie W S, Aber J D, et al. Effects of chronic nitrogen amendments on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 105(1/2): 175–182

[14] Huang W Z, Schoenau J J. Fluxes of water-soluble nitrogen and phosphorus in the forest floor and surface mineral soil of a boreal aspen stand[J]. Geoderma, 1998, 81(3/4): 251–264

[15] Guggenberger G, Zech W. Composition and dynamics of dissolved carbohydrates and lignin-degradation products in two coniferous forests, N.E. Bavaria, Germany[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(1): 19–27

[16] 刘小飞, 林廷武, 熊德成, 等. 土壤增温及降雨隔离对杉木幼林林下植被生物量的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(3): 92–95
Liu X F, Lin T W, Xiong D C, et al. Interactive responses of undergrowth vegetation biomass in Chinese fir to soil warming and precipitation separation[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2014, 9(3): 92–95

[17] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009–1013

[18] 刘小飞, 陈仕东, 熊德成, 等. 高频观测的土壤异养呼吸昼夜变化[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(1): 92–94
Liu X F, Chen S D, Xiong D C, et al. High-frequency analysis of the diel patterns of soil heterotrophic respiration[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2014, 9(1): 92–94

[19] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, et al. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010, 90(1): 27–36

[20] Akagi J, ZsolnayÁ, Bastida F. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: Air-drying and pre-incubation[J]. Chemosphere, 2007, 69(7): 1040–1046

[21] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, et al. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. Chemosphere, 1999, 38(1): 45–50

[22] Kanokkantapong V, Marhaba T F, Panyapinyophol B, et al. FTIR evaluation of functional groups involved in the formation of haloacetic acids during the chlorination of raw water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(2): 188–196

[23] He X S, Xi B D, Wei Z M, et al. Physicochemical and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter extracted from municipal solid waste (MSW) and their influence on the landfill biological stability[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2322–2327

[24] Wang Q Y, Wang Y, Wang Q C, et al. Effects of land use changes on the spectroscopic characterization of hot-water extractable organic matter along a chronosequence: Correlations with soil enzyme activity[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 58: 8–12

[25] Scott E E, Rothstein D E. The dynamic exchange of dissolved organic matter percolating through six diverse soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 69: 83–92

[26] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(4): 742–746

[27] Michel K, Matzner E, Dignac M F, et al. Properties of dissolved organic matter related to soil organic matter quality and nitrogen additions in Norway spruce forest floors[J]. Geoderma, 2006, 130(3/4): 250–264

[28] 刘煜, 胡小飞, 陈伏生, 等. 马尾松和苦槠林根际土壤矿化和根系分解 CO_2 释放的温度敏感性[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1501–1508
Liu Y, Hu X F, Chen F S, et al. Temperature sensitivity of CO_2 fluxes from rhizosphere soil mineralization and root decomposition in *Pinus massoniana* and *Castanopsis sclerophylla* forests[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1501–1508

[29] Marilley L, Hartwig U A, Aragno M. Influence of an elevated atmospheric CO_2 content on soil and rhizosphere bacterial communities beneath *Lolium perenne* and *Trifolium repens* under field conditions[J]. Microbial Ecology, 1999, 38(1): 39–49

[30] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1485–1498

[31] Eamus D. Ecophysiological traits of deciduous and evergreen woody species in the seasonally dry tropics[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(1): 11–16